

# ТЕПЛОВЫЕ, ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 536.24

## ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛАНАРНЫХ ТРАКТОВ ОХЛАЖДЕНИЯ КАМЕР ЖРД

**В.П. Александренков**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: aleks@power.bmstu.ru

*Рассмотрены кольцевые компланарные (с перекрестно расположенными ребрами) тракты для охлаждения камер жидкостных ракетных двигателей по критерию максимального теплосъема. По имеющимся опытным данным о конвективной составляющей теплоотдачи выполнено расчетно-аналитическое исследование влияния теплогидравлических характеристик течения и параметров оребрения в таких трактах на эффективность их применения. Показана возможность использования предлагаемой методики оценки эффективности интенсификации теплоотдачи в обычных оребренных трактах с учетом особенностей компланарного течения. Установлены области параметров оребрения со значительно более высокой (2–4 раза) эффективностью по сравнению с обычным оребрением охлаждающих трактов.*

**Ключевые слова:** кольцевой компланарный канал, перекрестно расположенные ребра, интенсификация конвективной теплоотдачи, эффективность, максимальный теплосъем, параметры оребрения, теплогидравлические характеристики.

## THERMOHYDRAULIC EFFICIENCY OF COMPLANAR COOLING CIRCUITS FOR LIQUID-PROPELLANT ENGINE CHAMBERS

**V.P. Aleksandrenkov**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: aleks@power.bmstu.ru

*Cooling circuits of liquid-propellant engines having circular complanar form (with cross finning) are analyzed by means of maximal heat removal criterion. Computational and analytical research is carried out on the base of available empirical data concerning a convective component of heat transfer. Influence of the flow thermal and hydraulic parameters as well as of finning parameters of these cooling circuits on their application efficiency is considered. Possibility to use proposed methodology of heat transfer efficiency evaluation for usual finned channels with regard for complanar flow peculiarities is demonstrated. The domain of finning parameters of higher (2–4-fold) efficiency is defined in comparison with usual finning of the LPE cooling circuits.*

**Keywords:** circular complanar channel, cross finning, intensification of convective heat transfer, efficiency, maximum heat removal, finning parameters, thermohydraulic characteristics.

Тракты охлаждения камер жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) представляют собой кольцевые каналы, образованные двумя оболочка-

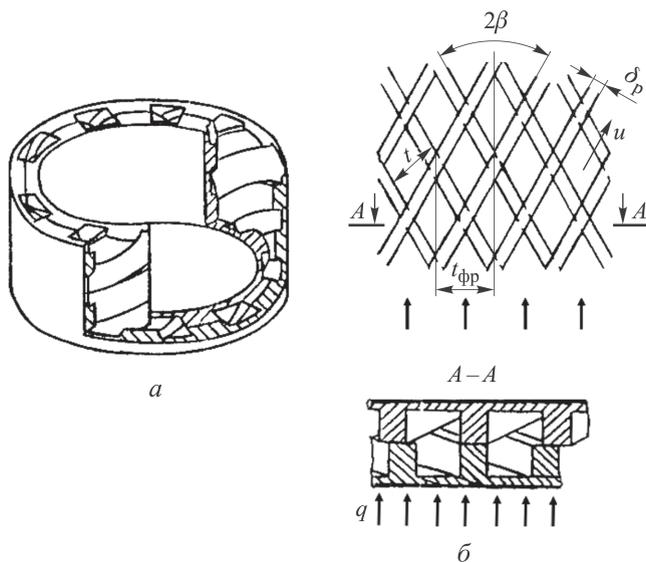
ми, связанными между собой оребрением. Как было показано в работе [1], фактор оребрения существенно сказывается на эффективности охлаждения огневой стенки. При этом оказалось, что фактор оребрения в определенных условиях может привести и к отрицательным результатам, т.е. к понижению значения теплосъема по сравнению со случаем эталонного гладкого канала без интенсификации теплообмена (ИТ). Поэтому интенсификация конвективной составляющей теплоотдачи становится актуальной задачей как дополнительная или компенсационная мера для существенного увеличения значения теплосъема с огневой стенки в целях достижения требуемых условий охлаждения.

Учитывая реальный масштаб оребрения и технологические ограничения, применение известных традиционных способов ИТ, таких как, например, “искусственная шероховатость”, довольно ограничены.

В работах [2, 3] описан и исследован способ интенсификации тепло- и массообмена в кольцевых оребренных трактах, названный условно вихревым или компланарным трактом. Компланарный тракт (КТ) (рис. 1) представляет собой оригинальную конструкцию связанных оболочек с перекрестно расположенными ребрами, выполненными на противоположных поверхностях кольцевого канала, и обеспечивающих перекрестное течение теплоносителя.

Такое конструктивное решение является частной разновидностью классического оребренного тракта с дополнительными геометрическими параметрами и с очевидной спецификой как самих механизмов тепло- и массопереноса, так и их расчета.

Физическая модель течения в таком тракте представляется совокупностью индивидуальных компланарных вихревых потоков, форми-



**Рис. 1. Компланарный тракт:**  
*a* — общий вид тракта; *б* — развертка тракта

руемых перекрестным оребрением за счет вязких сил в межреберных каналах, образованных на противоположных сторонах тракта. Противоположно направленные перекрестные вихревые потоки взаимодействуют через слой смешения.

В слое смешения перекрестных потоков происходит непрерывная деформация и трансформация пограничных слоев взаимодействующих потоков, обуславливающая сложную картину механизмов их взаимодействия, сопровождаемых переносом импульса, теплоты и массы.

Принцип интенсификации теплообмена в таком тракте объясняется совокупностью нескольких факторов механизма взаимодействия, таких как генерация турбулентных пульсаций в слое смешения и их перенос вихревым течением на омываемую поверхность межреберных каналов, замещение нагретых слоев теплоносителя у теплоотдающих поверхностей на более холодные слои противоположных периферийных потоков.

Экспериментальные исследования теплогидравлических характеристик (ТГХ) КТ [4] проводили при следующих условиях. Углы наклона ребер выполнялись как симметричными, так и несимметричными в диапазоне суммарного угла  $2\beta = 45 \dots 120^\circ$ ; высота ребер на теплоотдающей поверхности  $h_1$  составляла половину высоты тракта  $h$ . Конфигурация межреберных каналов, характеризуемая отношением высоты ребра к ширине канала  $\chi = h_1/a$ , симметричная и асимметричная в диапазоне  $\chi = 0,25 \dots 1,1$ , а диапазон исследованных относительных шагов ребер  $\bar{t} = t/\delta_p$  на теплоотдающей поверхности составлял при этом  $2,36 \dots 7,00$ , диапазон режимов течения  $Re = 10^3 \dots 6 \cdot 10^4$ . Плотность контакта ребер по вершинам не обеспечивалась, что сводило перетечки теплоты в сопряженные ребра к нулю.

Проведенные исследования установили определяющее влияние на ТГХ КТ параметра режима течения — числа Рейнольдса и угла взаимного пересечения ребер  $2\beta$ , тогда как влияние шага и асимметричности углов расположения ребер оказалось несущественным.

По результатам проведенных опытов и обработки результатов были получены аппроксимирующие выражения для ТГХ, которые можно представить в следующем виде. Коэффициент конвективной теплоотдачи, т.е. за вычетом доли вклада оребрения в эффективную теплоотдачу, имеет вид

$$St = \exp(-2,47 + 0,81\beta) Re^{-0,32} Pr^{-0,6}$$

или

$$Nu = e^{(-2,47+0,81\beta)} Re^{0,68} Pr^{0,4};$$

коэффициент гидравлического сопротивления трения можно записать как

$$\xi = e^{(5,24+2,94\beta)} Re^{-1,32} + e^{(-4,7+3,46\beta)},$$

где  $Re = (\rho u d_3) / \mu$  — число Рейнольдса;  $Pr = \mu c_p / \lambda$  — число Прандтля;  $\beta$  — половина угла ( $2\beta$ ) взаимного пересечения ребер, рад;  $u$  — среднemasсовая скорость течения в межреберных каналах;  $d_3$  — эквивалентный гидравлический диаметр межреберных каналов. Свойства охладителя определялись по среднemasсовой температуре потока в размерности СИ, рад.

Относительные теплогидравлические характеристики КТ можно получить путем сопоставления их с характеристиками эталонного, например, гладкого кольцевого канала при сходственных значениях чисел  $Re$  и  $Pr$ .

Характеристики такого эталонного канала могут быть представлены следующими зависимостями [5]:

$$Nu_{\text{гл}} = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}$$

— коэффициент конвективной теплоотдачи,

$$\xi_{\text{гл}} = 0,348 Re^{-0,25}$$

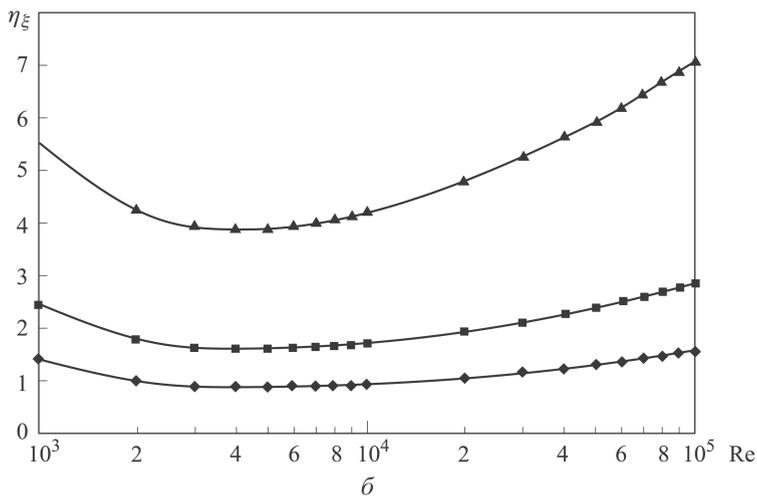
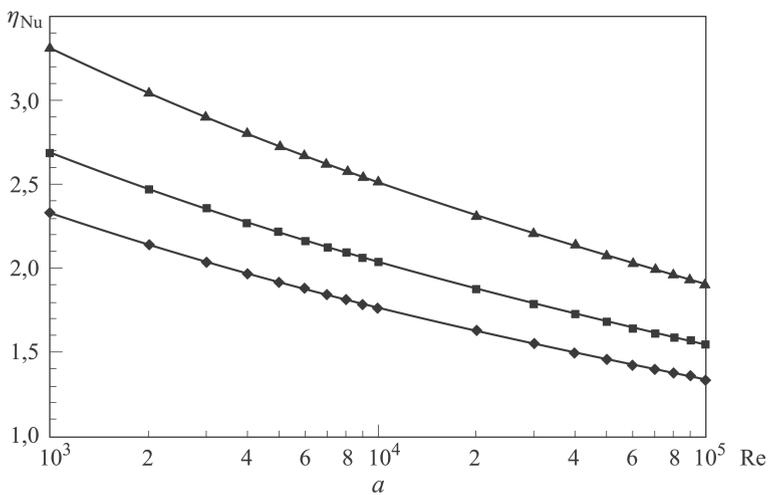
— коэффициент гидравлического сопротивления трения, где числа подобия  $Re$  и  $Nu$  определяются по эквивалентному гидравлическому диаметру кольцевого канала  $d_{\text{гл}} = 2h$  и среднemasсовой скорости. Теплофизические свойства охладителя определяются по среднemasсовой температуре потока в размерности СИ.

Результаты такой обработки относительных ТГХ приведены на рис. 2, где  $\eta_{Nu} = \left( \frac{Nu Pr^{-0,4}}{Nu_{\text{гл}} Pr_{\text{гл}}^{-0,4}} \right)_{Re}$ ;  $\eta_{\xi} = (\xi / \xi_{\text{гл}})_{Re}$ .

Анализ полученных результатов показывает, что с ростом угла пересечения ребер  $\beta$  уровень относительных ТГХ существенно возрастает. При этом с ростом числа  $Re$  характеристика  $\eta_{Nu}$  монотонно убывает, что свидетельствует о постепенном вырождении эффекта интенсификации конвективной теплоотдачи. Относительная же гидравлическая характеристика  $\eta_{\xi}$  имеет тенденцию к оптимуму ( $\min$ ) в зоне перехода течения от ламинарного к турбулентному. Примечательной особенностью приведенных характеристик является тот факт, что в области переходных режимов течения и умеренных углов пересечения ребер уровень интенсификации теплоотдачи превышает уровень возрастания гидросопротивления. Однако уже при  $\beta = 35 \dots 45^\circ$  увеличение  $\eta_{\xi}$  опережает  $\eta_{Nu}$  (рис. 3).

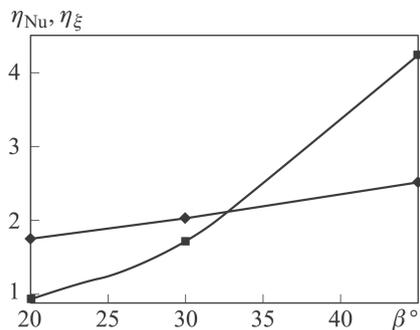
Исходя из того, что КТ является частной конструктивной разновидностью кольцевого оребренного тракта, оценка эффективности его применения может быть проведена на основе ранее предложенной методики [1], согласно которой эффективность оребренных кольцевых трактов охлаждения камер сгорания по критерию максимального теплосъема может быть рассчитана по формуле

$$K_Q = K_{Q_0} A^*,$$



**Рис. 2.** Относительные теплогидравлические характеристики КТ при различных углах  $\beta$  ( $\blacklozenge$  –  $20^\circ$ ;  $\blacksquare$  –  $30^\circ$ ;  $\blacktriangle$  –  $45^\circ$ ):

$a$  – тепловая характеристика,  $b$  – гидравлическая характеристика



**Рис. 3.** Характер зависимостей относительных ТГХ от угла  $\beta$  при  $Re = 10^5$ :

$\blacksquare$  –  $\eta_\xi$ ;  $\blacklozenge$  –  $\eta_{Nu}$

где  $K_{Q_0} = \eta_{Nu} \eta_\xi^{-1/3} K_{\Delta p} (K_m/k_D)^{\frac{3n-2-m}{3}}$  – эффективность ИТ по конвективной составляющей в кольцевом неоребрённом тракте ( $k_D = \frac{D_1 + h}{D_1 + h_{гт}}$  – поправочный коэффициент на изменение среднего диа-

метра тракта,  $K_{\Delta p}$ ,  $K_m$  — условия сравнения);  $A^* = A_p \eta_p$  — теплогеометрический фактор оребрения ( $A_p$  — геометрический параметр оребрения тракта,  $\eta_p$  — коэффициент эффективности оребрения).

При прочих равных условиях, т.е. при равенстве гидравлических потерь давления и расхода охладителя ( $K_{\Delta p}$  и  $K_m$  равны единице), критерий эффективности  $K_{Q_0}$  будет определяться в основном степенной зависимостью от относительной гидравлической характеристики  $\eta_\xi^{-1/3}$  и коэффициента интенсификации конвективной теплоотдачи  $\eta_{Nu}$ .

Геометрический параметр оребрения тракта при однонаправленных ребрах определяется формулой [1]

$$A_p = \left( \frac{\bar{t}}{(\bar{t} + \bar{h} - 1) \cos \beta} \right)^{\frac{3n-m-2}{3}},$$

где  $\bar{t} = \frac{t}{\delta_p}$ ;  $\bar{h} = \frac{h}{\delta_p}$ ;  $t$  и  $\delta_p$  — шаг и толщина ребра по нормали;  $h$  — высота ребра, равная высоте тракта;  $\beta$  — угол наклона ребер к образующей;  $n$  и  $m$  — степенные коэффициенты аппроксимации в закономерностях для  $Nu$  и  $\xi$ .

Параметр  $A_p$  получен в результате преобразования относительных переменных задачи в объекте и эталонном гладком канале. Полагая, что шаги ребер на рабочей (теплоотдающей) и противостоящей (формирующей) поверхностях КТ по нормали к ребрам выполняются соразмерными, можно считать, что они равные, т.е.  $t_1 \approx t_2$ . Полная высота тракта  $h$  определяется суммой высот ребер на противоположных стенках, т.е.  $h = h_1 + h_2$ , а угол  $\beta$  при умеренной асимметрии закрутки ребер можно принять равным половине угла взаимного пересечения ребер КТ, т.е.  $\beta = 0,5(2\beta)$ . Таким образом, параметр  $A_p$ , обусловленный формой получения и обработки относительных ТГХ для случая КТ, можно считать эквивалентным своему значению для обычных оребренных трактов.

Коэффициент эффективности оребрения  $\eta_p$ , как известно [6], учитывает в совокупности как непосредственное развитие теплоотдающей поверхности, так и тепловую эффективность работы ребер:

$$\eta_p = 1 - \frac{1}{\bar{t}} + \frac{2\bar{h}_p}{\bar{t}} \left( \frac{\text{th} \left( \frac{\bar{h}_p \sqrt{2 \text{Bi}}}{\bar{h}_p \sqrt{2 \text{Bi}}} \right)}{\bar{h}_p \sqrt{2 \text{Bi}}} \right) \xi,$$

где  $\text{Bi} = \alpha \delta_p / \lambda_p$  — число Био;  $\xi$  — поправочный коэффициент на возможный вклад в теплосъем наружной стенки тракта, в реальных случаях принимаемый часто равным единице.

Для случая КТ рассмотрим отдельно учет тепловых и геометрических параметров при расчете  $\eta_p$ . Основной вклад в тепловой эффект оребрения очевидно вносят ребра высотой  $h_1$ , расположенные

на теплоотдающей поверхности, тогда как ребра (высотой  $h_2$ ) на противоположной стенке тракта, так называемые формообразующие ребра, могут работать, т.е. принимать и передавать теплоту только через пятна контакта с ребрами  $h_1$ . Учитывая реальный диапазон шага оребрения  $\bar{t} = 2,5 \dots 7$  и высоты  $\bar{h}_1 = 3 \dots 10$  площадь этих контактных пятен, как и передаваемую ими теплоту, можно принять несущественными, тем более с учетом возможного контактного сопротивления. Поэтому в расчете  $\eta_p$  следует учитывать только высоту ребер на теплоотдающей поверхности  $h_1$ .

В то же время кроме боковой поверхности ребер  $h_1$  в теплоотдачу могут вносить вклад свободные от контакта торцевые поверхности ребер, что можно учесть дополнительным коэффициентом  $\xi_{\text{тор}}$ . Тогда формула для расчета коэффициента оребрения принимает вид

$$\eta_p = 1 - \frac{1}{\bar{t}} + \frac{2\bar{h}_1}{\bar{t}} \frac{\text{th}(\bar{h}_1 \sqrt{2\text{Bi}})}{\bar{h}_1 \sqrt{2\text{Bi}}} \xi_{\text{тор}},$$

где  $\bar{t} = \frac{t}{\delta_{p1}}$ ,  $\bar{h}_1 = \frac{h_1}{\delta_{p1}}$  — относительные значения параметров оребрения, т.е. шага и высоты ( $t, h_1$ ),  $\delta_{p1}$  — толщина ребер на теплоотдающей поверхности).

Коэффициент участия торцевых поверхностей ребер, как показывает несложный анализ, может быть выражен через относительную долю свободной поверхности торцев  $\bar{S}_p$  и относительную высоту ребер  $h_1$  зависимостью

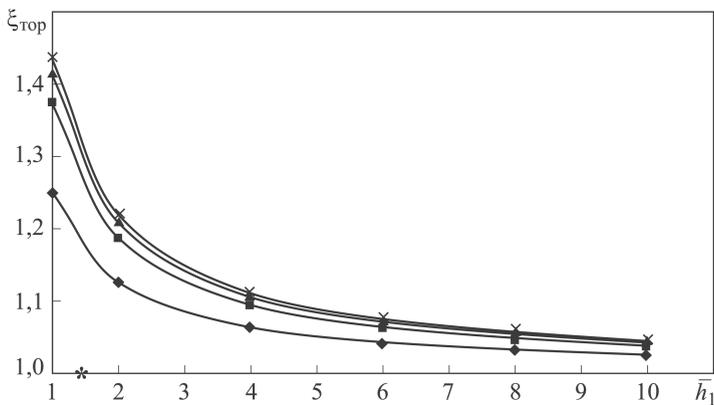
$$\xi_{\text{тор}} = \left( 1 + 0,5 \frac{\bar{S}_p}{\bar{h}_1} \right),$$

где  $\bar{S}_p = (1 - 1/\bar{t})$  — относительная доля свободной площади торцев ребер на теплоотдающей стенке, не занятая контактом с сопряженными ребрами.

Характер изменения коэффициента  $\xi_{\text{тор}}$  от параметров оребрения представлен на рис. 4.

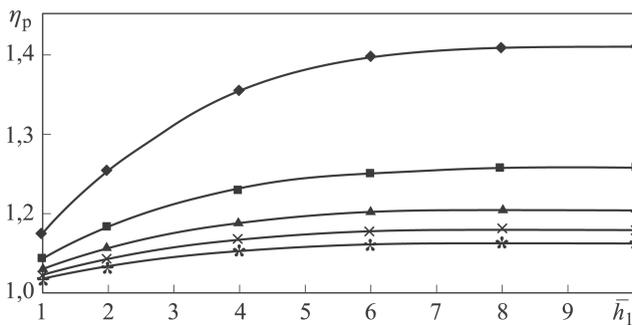
С учетом влияния  $\xi_{\text{тор}}$  коэффициент оребрения  $\eta_p$  заметно увеличивается в области низких высот ребер ( $\bar{h}_1 = 1 \dots 4$ ) и затем стремится к стабильным значениям и при этом увеличивается с ростом значения шага (рис. 5). С ростом числа Био коэффициент оребрения заметно снижается.

Характер изменения совокупного теплогеометрического параметра  $A^* = A_p \eta_p$  (рис. 6) свидетельствует о следующем. Как и ожидалось, в целом характер изменения  $A^*$  соответствует случаю полноразмерного оребрения в части высоты ребра, но по своим абсолютным значениям он ниже на 15...30% в основном вследствие учета в коэффициенте оребрения только высоты  $\bar{h}_1$  ребер на теплоотдающей поверхности.



**Рис. 4. Характер зависимости вклада торцевых поверхностей ребер от параметров оребрения  $\bar{t}$ :**

◆ –  $t = 2$ ; ■ –  $t = 4$ ; ▲ –  $t = 6$ ; × –  $t = 8$



**Рис. 5. Зависимость коэффициента оребрения  $\eta_p$  от параметров оребрения КТ с учетом торцевых поверхностей ребер при  $Bi = 0,04$ :**

◆ –  $t = 2$ ; ■ –  $t = 4$ ; ▲ –  $t = 6$ ; × –  $t = 8$ ; \* –  $t = 10$

При этом максимум его значений смещается в область больших значений  $\bar{h}_1$ , что расширяет зону оптимальных параметров оребрения.

Во всем остальном расчет и анализ эффективности ИТ в КТ может быть осуществлен по ранее изложенной методике для кольцевых оребренных трактов [1] с учетом присущих им факторов и специфических параметров и особенностей сопряженного перекрестного расположения ребер. Исходя из этого была проведена расчетно-аналитическая оценка энергетической эффективности применения КТ для охлаждения камеры ЖРД.

Эффективность КТ по конвективной составляющей  $K_{Q_0}$  (при  $\beta > 30^\circ$ , рис. 7) достигает значительных значений (от 1,5 до 4 и более), что с учетом уровня теплогометрического параметра  $A^*$  не ниже единицы в диапазоне исследованных параметров свидетельствует о возможном положительном эффекте использования компланарного течения в тракте охлаждения во всем рекомендуемом диапазоне чисел Re. Однако, при  $\beta < 30^\circ$  эффективность отсутствует.

Итоговые результаты оценки эффективности по критерию  $K_Q$  подтверждают эти ожидания. При этом установлено, что определяющим

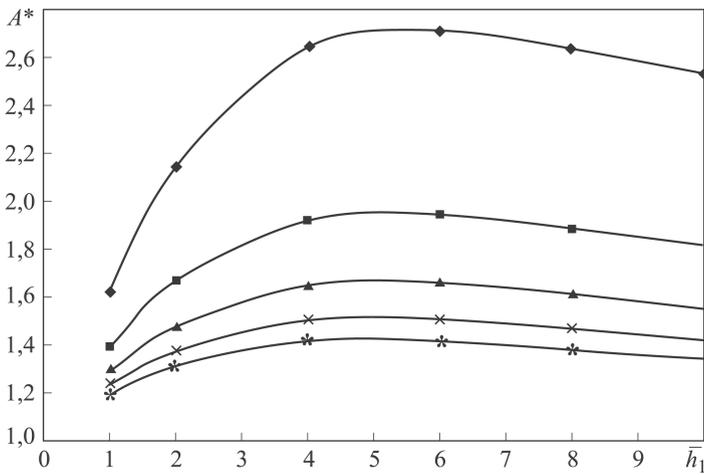


Рис. 6. Зависимость совокупного теплогеометрического параметра  $A^*$  от параметров оребрения при  $\beta = 30^\circ$  и  $Bi = 0,04$  (обозначения см. рис. 5)

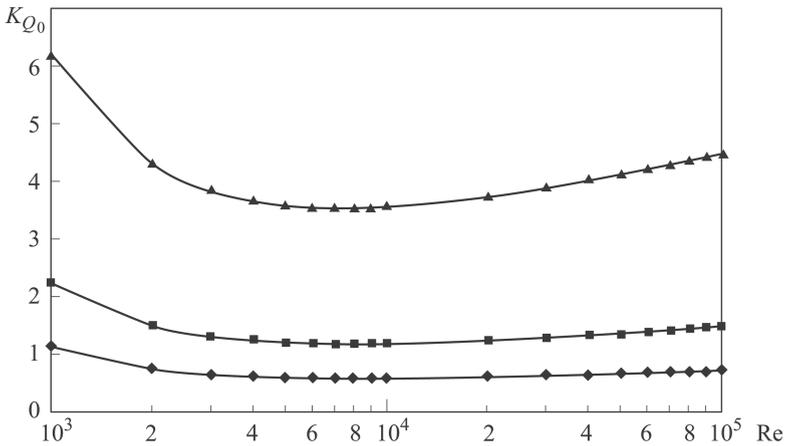


Рис. 7. Зависимость конвективной составляющей критерия эффективности  $K_{Q_0}$  от режима течения при различных углах пересечения ребер:

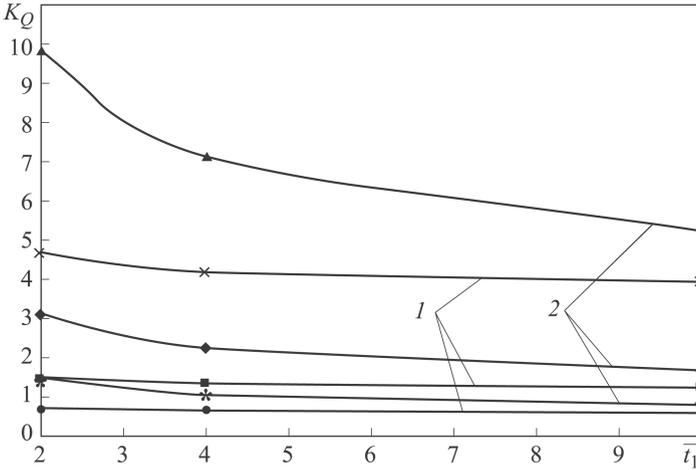
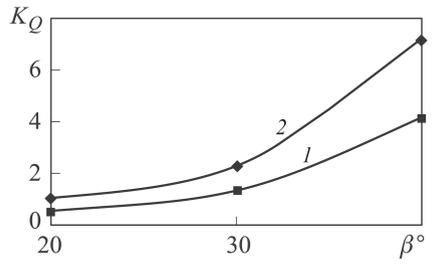
◆ –  $\beta = 20^\circ$ ; ■ –  $\beta = 30^\circ$ ; ▲ –  $\beta = 45^\circ$

фактором эффективности выступают угол  $\beta$  пересечения ребер и число Био оребрения. Так, при увеличении угла  $\beta$  от  $30^\circ$  до  $40^\circ$   $K_Q$  возрастает в 3–4 раза, а с уменьшением  $Bi$  от 0,4 до 0,04  $K_Q$  возрастает в 1,7–2 раза (рис. 8). В то же время для углов  $\beta$  меньше  $20 \dots 30^\circ$  наблюдается малоэффективные и неэффективные значения критерия  $K_Q$  даже при благоприятных значениях числа Био.

При частом расположении ребер показатель эффективности  $K_Q$  может достигать значения от 3 до 10 единиц. Однако по мере увеличения шага оребрения  $\bar{h}_1$  показатель эффективности  $K_Q$  снижается, особенно это заметно при малых (благоприятных) значениях  $Bi$  (рис. 9).

Существенный вклад в зависимость эффективности  $K_Q$  от высоты теплоотдающих ребер  $\bar{h}_1$  вносят значения углов  $\beta$  и чисел Био, как в количественном, так и в качественном отношении. Так, при благоприятных

**Рис. 8. Влияние угла пересечения ребер на критерий эффективности  $K_Q$  при различных числах Био ( $Re = 10^4$ ;  $\bar{h}_1 = 4$ ;  $\bar{t}_p = 4$ ):**  
 кривая 1 —  $Bi = 0,4$ ; кривая 2 —  $Bi = 0,04$



**Рис. 9. Зависимость критерия эффективности  $K_Q$  от шага оребрения при различных углах  $\beta$  и числах Био ( $Re = 10^4$ ;  $\bar{h}_1 = 4$ ):**  
 кривые 1 ( $Bi = 0,4$ ) —  $\bullet$  —  $\beta = 20^\circ$ ;  $\blacksquare$  —  $\beta = 30^\circ$ ;  $\times$  —  $\beta = 45^\circ$ ; кривые 2 ( $Bi = 0,04$ ) —  $*$  —  $\beta = 20^\circ$ ;  $\blacklozenge$  —  $\beta = 30^\circ$ ;  $\blacktriangle$  —  $\beta = 45^\circ$

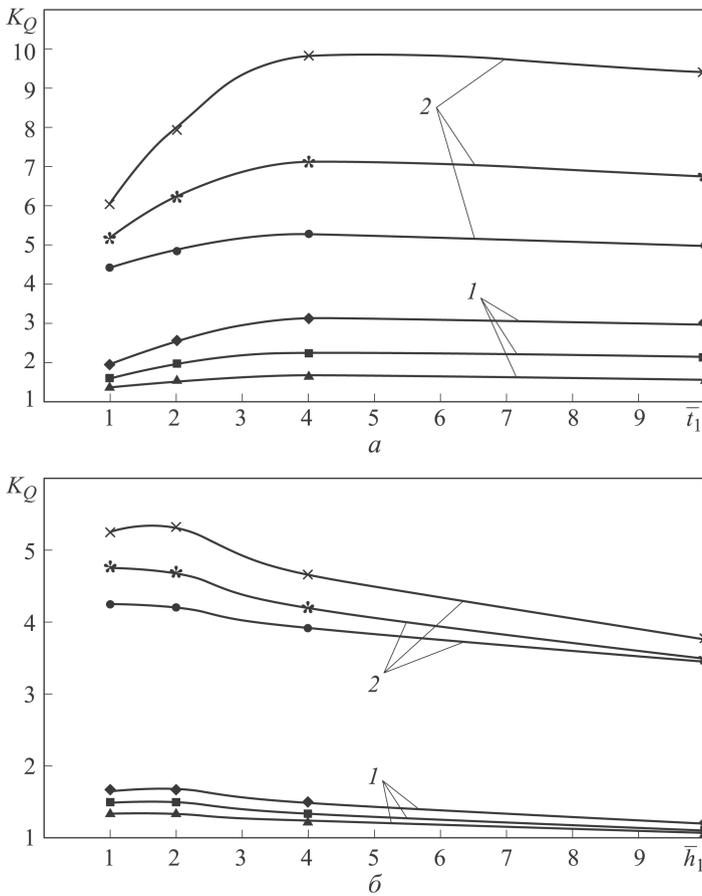
ятном (оптимистичном) значении  $Bi = 0,04$  с ростом высоты ребер  $\bar{h}_1$  от 1 до 4 критерий  $K_Q$  возрастает до значений 3... 10 единиц и далее практически стабилизируется. При пессимистических значениях  $Bi = 0,4$  уровень эффективности не превышает 1,5... 5,5 единиц и с ростом  $\bar{h}_1$  во всем диапазоне значений заметно уменьшается, и одновременно проявляет слабую чувствительность к шагу оребрения (рис. 10). Данная оценка может быть использована для выбора параметров оребрения при проектировании трактов охлаждения.

Исследование увеличения высоты КТ по сравнению с эталоном проводилось как для обычного оребренного тракта следующим образом:

$$\bar{h} = \frac{h}{h_{\text{гл}}} = \bar{h}_0 K_{hp},$$

где  $\bar{h}_0 = \eta_\xi^{1/3}$  — относительное увеличение высоты неоребреного тракта, связанное с интенсификацией конвективной теплоотдачи,

$$K_{hp} = (k_D \cos \beta)^{-\frac{m+2}{3}} \frac{\bar{t}}{\bar{t} - 1} \left( \frac{\bar{t} + \bar{h} - 1}{\bar{t}} \right)^{\frac{1-m}{3}}$$



**Рис. 10. Зависимость критерия эффективности  $K_Q$  от высоты ребер для различных углов  $\beta$  и шагов оребрения  $\bar{t}$  ( $Re = 10^4$ ):**

$a$  – кривые 1 ( $\beta = 30^\circ$ ) –  $\blacklozenge$  –  $t = 2$ ;  $\blacksquare$  –  $t = 4$ ;  $\blacktriangle$  –  $t = 10$ ; кривые 2 ( $\beta = 45^\circ$ ) –  $\times$  –  $t = 2$ ;  $*$  –  $t = 4$ ;  $\bullet$  –  $t = 10$  при  $Bi = 0,04$ ;  $\bar{b}$  – кривые 1 ( $\beta = 30^\circ$ ) –  $\blacklozenge$  –  $t = 2$ ;  $\blacksquare$  –  $t = 4$ ;  $\blacktriangle$  –  $t = 10$ ; кривые 2 ( $\beta = 45^\circ$ ) –  $\times$  –  $t = 2$ ;  $*$  –  $t = 4$ ;  $\bullet$  –  $t = 10$  при  $Bi = 0,4$

– коэффициент увеличения высоты оребренного тракта, здесь  $\bar{h} = h/\delta_p = (h_1 + h_2)/\delta_p$  – определяется по сумме высот теплоотдающих и формообразующих ребер, поскольку увеличение высоты обусловлено только гидравлическими потерями всего тракта,  $k_D = \frac{D_1 + h}{D_1 + h_3}$  – поправочный коэффициент на изменение среднего диаметра тракта, слабо влияющий на конечный результат.

Коэффициент увеличения высоты тракта, обусловленной оребрением в режиме турбулентного течения ( $n = 0,8$ ;  $m = -0,25$ ), составит  $K_{hp} = (k_D \cos \beta)^{-0,583} \bar{t}^{+0,583} (\bar{t} + \bar{h} - 1)^{0,417} / (\bar{t} - 1)$  и, как показано ранее, может возрастать в исследованном диапазоне параметров до значений  $1,15 \dots 3,5$ , что следует учитывать при проектировании теплозащиты камеры.

**Выводы.** Применение компланарного течения в охлаждающих трактах камер позволит существенно увеличить их энергетическую эффективность по критерию относительного значения теплосъема с огневой стенки в основном за счет увеличения конвективной составляющей по сравнению с трактами с классическим оребрением и недостаточной эффективностью.

Изменяя значения параметров оребрения, таких как угол взаимного пересечения ребер  $2\beta$ , число Био, относительный шаг оребрения  $\bar{t}$  и высота ребер  $\bar{h}_1$ , в допустимых и разумных пределах, можно управлять теплогидравлической эффективностью и достичь желаемого уровня теплоотвода и теплового состояния конструкции.

Расчет оценки эффективности КТ по критерию  $K_Q$  может проводиться на основе ранее разработанной методики для классических оребренных трактов с поправками на действительную полезную площадь оребрения теплоотдающей поверхности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Александренков В.П. Эффективность интенсификации теплоотдачи в кольцевых оребренных трактах охлаждения камер сгорания // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2013. № 3. С. 111–121.
2. Кудрявцев В.М., Орлин С.А., Поснов С.А. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления в трактах с компланарными каналами // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1983. № 4. С. 54–58.
3. Пелевин Ф.В., Ильинская О.И., Орлин С.А. Применение компланарных каналов в технике // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2014. № 2 (37). С. 71–85.
4. Орлин С.А., Поснов С.А. Экспериментальное исследование теплообмена и гидравлического сопротивления в кольцевых трактах с компланарными каналами // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1984. № 417. С. 9–12.
5. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы / под общ. ред. П.Л. Кириллова. М.: Энергоатомиздат, 1990. 360 с.
6. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей / под ред. В.М. Кудрявцева. М.: Высш. шк., 1993. 703 с.

## REFERENCES

- [1] Aleksandrenkov V.P. Efficiency of heat transfer intensification in circular finned cooling circuits of combustion chambers. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2013, no. 3, pp. 111–121 (in Russ.).
- [2] Kudryavtsev V.M., Orlin S.A., Posnov S.A. Experimental research of flow resistance in circuits with complanar channels. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Mashinost.* [Proc. Univ., Mech. Eng.], 1983, no. 4, pp. 54–58 (in Russ.).
- [3] Pelevin F.V., Il'inskaya O.I., Orlin S.A. Engineering application of coplanar channels. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin], 2014, no. 2 (37), pp. 71–85 (in Russ.).

- [4] Orlin S.A., Posnov S.A. Experimental research of heat transfer and flow resistance in circular ducts with complanar channels. *Trudy MVTU im. N.E.Baumana* [Proc. Bauman MSTU], 1984, no. 417, pp. 9–12 (in Russ.).
- [5] Kirillov P.L., Yur'ev Yu.S., Bobkov V.P., ed. *Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam. Yadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory* [Reference book on thermal and hydraulic calculations. Nuclear reactors, heat exchangers, steam generators]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 360 p.
- [6] Kudryavtsev V.M., ed. *Osnovy teorii i rascheta zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Theory and design bases of liquid propellant rocket engines]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1993. 703 p.

Статья поступила в редакцию 24.05.2014

Александренков Владислав Петрович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент кафедры “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области исследования процессов теплообмена и интенсификации теплоотдачи.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Aleksandrenkov V.P — Cand. Sci. (Eng.), associate professor of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University, senior researcher of the Power Engineering Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 70 publications in the field of processes of heat exchange and heat release intensification.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.